

Erweiterung des Nutzens von Sensordaten durch Verwendung in simulationsgestützten virtuellen Sensoren auf Basis der Finite-Elemente-Analyse

Andreas Kormann^{1*}, Claudia Kleinschrodt¹, Stephan Tremmel¹

¹ Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth

* Korrespondierender Autor:

Andreas Kormann
Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD
Universitätsstraße 30
95447 Bayreuth
Telefon: 0921 55-7196
Mail: andreas.kormann@uni-bayreuth.de

Abstract

Within the framework of digital engineering, the digital development of products is always advanced. Extensive knowledge of the designed product and its properties is necessary for this purpose. Simulation-based virtual sensors are suitable for reducing the costs of test benchmark trials by making maximum use of the sensor data obtained there. These sensors, which are based on finite element analysis, are used in the same way as physical sensors after they have been applied digitally. In this paper, methods are presented how these sensors can be applied and which limitations they have.

Keywords

Digital Engineering, Finite Element Analysis, Virtual Sensor

1. Einleitung und Motivation

Die Absicherung von Bauteilen ist ein wichtiger Bestandteil des Produktentwicklungsprozesses und garantiert die Funktionsweise und Haltbarkeit der entwickelten Komponenten. Insbesondere im Kontext von hoher Optimierung der Bauteile und damit geringeren Sicherheitsfaktoren ist es essentiell, die Belastung auf das Bauteil zu kennen. Digital werden neue Produkte schon während der Entwicklung durch Simulationen überprüft. Experimentell erfolgt dies über Prüfstandsversuche [1]. Bei Prototypenversuchen werden Sensoren in großer Stückzahl benötigt, um den Zustand von Maschinenelementen umfassend aufzuzeichnen. Die Applikation der hierfür verwendeten realen Sensoren, nachfolgend als physikalische Sensoren (PS) bezeichnet, gestaltet sich oftmals schwierig. So ist es unter anderem aufgrund hoher Applikationskosten, schlechter Zugänglichkeit von Messstellen oder der maßgeblichen Beeinflussung des Systems häufig nicht möglich, Sensoren in ausreichender Stückzahl zu verbauen [2, 3]. Damit die durch diese Umstände fehlenden Sensordaten dennoch gewonnen werden können, eignen sich virtuelle Sensoren (VS), um fehlende oder schwer zu erhaltende Messwerte aus verfügbaren Daten zu ermitteln [4]. Dies geschieht, indem die mittels PS gewonnenen Sensordaten maschinell ausgewertet und daraus neue Erkenntnisse gewonnen werden. So werden für VS die von PS ermittelten Sensordaten als Eingangsgrößen verwendet und daraus durch verschiedene Auswertestrategien die benötigten Informationen ermittelt [5]. Werden die von PS erfassten Daten als Eingangsgrößen für eine Simulation, z.B. eine Finite-Elemente-Analyse (FEA) genutzt, wird dieser Spezialfall des virtuellen Sensors im Folgenden als simulationsgestützter virtueller Sensor (SVS) bezeichnet. Indem der VS gekapselt wird, kann er vom Endanwender ohne Umdenken analog zu einem PS verwendet werden [6]. Daraus resultiert eine einfache Handhabung und die Eignung des Konzeptes für ein breites Anwendungsspektrum.

In diesem Beitrag wird eine Methodik zur Entwicklung simulationsgestützter virtueller Sensoren beschrieben. Insbesondere wird geklärt, wie SVS in bestehende Auslegungsprozesse implementiert werden können, welche Anforderungen an sie gestellt werden und welche Einschränkungen sie aufweisen. Übergeordnetes Ziel ist es, einen automatisierten Prozess zu schaffen, in dem zuerst die Daten PS eingelesen und vorbereitet werden, um im Anschluss die aufbereiteten Daten als Eingangsgrößen für SVS zu nutzen. Die so ermittelten zusätzlichen Informationen führen durch eine nachgeschaltete automatisierte Auswertung innerhalb der SVS zu aussagekräftigen Ergebnissen. Abhängig vom Anwendungsfall und den daraus resultierenden Kernanforderungen werden in diesem Beitrag verschiedene Modellierungsstrategien zur Abbildung von SVS vorgestellt. Durch die Verschiebung des Fokus auf den jeweiligen Anwendungsfall ist es möglich, eine auf die Anforderungen optimierte Methode für SVS anzuwenden.

2. Verwendete Methoden und Vorgehensweisen

Zur Lösung der in Kapitel 1 genannten Probleme wurden gemeinsam mit Industriepartnern die Einsatzmöglichkeiten von PS und VS sowie deren jeweilige Grenzen eruiert. Auf dieser Basis wurden Anwendungsfälle für SVS, die sowohl erweiternd zu PS eingesetzt werden oder als Fail-Safe-Systeme dienen können, herausgearbeitet [7]. Die ermittelten Anforderungen dienen als Grundlage für die Erarbeitung einer Entscheidungslogik, die abhängig von den gegebenen Ansprüchen zwischen zwei Vorgehensweisen unterscheidet. Es wurden Modellierungsstrategien konzipiert, die entsprechend der zu unterscheidenden Kernanforderungen Genauigkeit sowie Echtzeitfähigkeit den Aufbau und das Vorgehen von SVS beschreiben.

Für die Umsetzung des Ansatzes, die Methodik der VS auf die Auswertung und Verwendung der PS mittels FEA anzuwenden, ist es notwendig, gewonnene Sensordaten

zunächst aufzubereiten und auszuwerten. Dies ist eine Voraussetzung, um sinnvolle Eingabedateien für eine FEA zu erhalten.

Die Auswertung der Ergebnisse der FEA ist ein weiterer wichtiger Bestandteil des Vorgehens. Um die Notwendigkeit der manuellen Betrachtung der Daten zu minimieren, gilt es vor der Messdurchführung Auswertestrategien zu definieren, um aus den großen Datenmengen, welche mittels FEA erzeugt werden, die relevanten Daten zu gewinnen. Das Ziel ist es, einen automatisierten Prozess zu schaffen, in dem Sensordaten aus PS eingelesen, aufbereitet und in einer FEA genutzt werden. Die Interpretation der Ergebnisse der FEA durch den Anwender soll durch eine automatisierte Auswertung anhand vorab definierter Kriterien ersetzt werden. Das Ergebnis stellt somit keine grafische Übersicht aus dem Finite-Elemente-Programm dar, sondern quantitative oder qualitative Aussagen zu den geforderten Messgrößen an ausgewählten Orten. Die Handhabung der durch einen simulationsgestützten VS erzeugten Daten soll somit äquivalent zu durch PS erzeugten Daten ablaufen.

3. Einsatz und Grenzen virtueller Sensoren

Nach Klostermeier [8] erlauben VS, auch solche Daten am digitalen Zwilling zu erfassen, die am realen Modell nicht oder nur kostenintensiv messbar sind. Ermöglicht wird dies durch die modellhafte Abbildung des digitalen Zwillings und seiner Umgebung. Dieses Modell wird via PS mit notwendigen Informationen aus der realen Umwelt versorgt.

VS werden bereits in vielen Anwendungsbereichen wie beispielsweise in dezentralen Systemen oder auch in Radarsystemen eingesetzt [4]. Sie werden dort für verschiedene Aufgaben verwendet. So werden sie neben der Überwachung unter anderem auch für Regelungen eingesetzt. Die Sensordaten, die unterschiedliche Messgrößen enthalten, können von einem VS kombiniert werden, um eine abstrakte Messung vorzunehmen [6]. Anwendungsgebiete hierfür liegen zum Beispiel im Bereich der chemischen Industrie. Dort ist es nicht oder nur eingeschränkt möglich alle zur Regelung von Reaktionsprozessen notwendigen Messdaten mittels realer Sensoren aufzunehmen. Da VS jedoch im Gegensatz zu PS kaum Einschränkungen hinsichtlich der Position des Sensors besitzen, können sie auch Prozesse an nicht erreichbaren Stellen dokumentieren.

Abhängig vom Anwendungsfall können sich die Auswertestrategien, die sich hinter VS verbergen, unterscheiden. So können Algorithmen, Modelle, Methoden des Machine Learnings und vieles mehr den Informationsgehalt von Sensordaten erweitern.

Werden zusätzliche Informationen mittels einer Simulation auf Basis von, zum Beispiel, durch PS erzeugten Daten generiert oder wird auf Daten, die durch eine solche Simulation erzeugt werden, zurückgegriffen, wird dieses Konzept im Folgenden als simulationsgestützter virtueller Sensor definiert. In Bild 1 wird ein Beispiel für die Anwendung eines SVS gezeigt. Hierbei werden Sensorwerte zweier Dehnmessstreifen aus einer realen Messung mit einer FEA verknüpft, um mit Hilfe eines SVS die Kerbspannung an einer kritischen Stelle des betrachteten Maschinenelements zu berechnen.

Auch bei SVS gibt es hinsichtlich ihrer Anwendung Einschränkungen, die auf Anforderungen bezüglich deren Genauigkeit und Echtzeitfähigkeit beruhen. Diese Anforderungen werden im Folgenden erläutert.

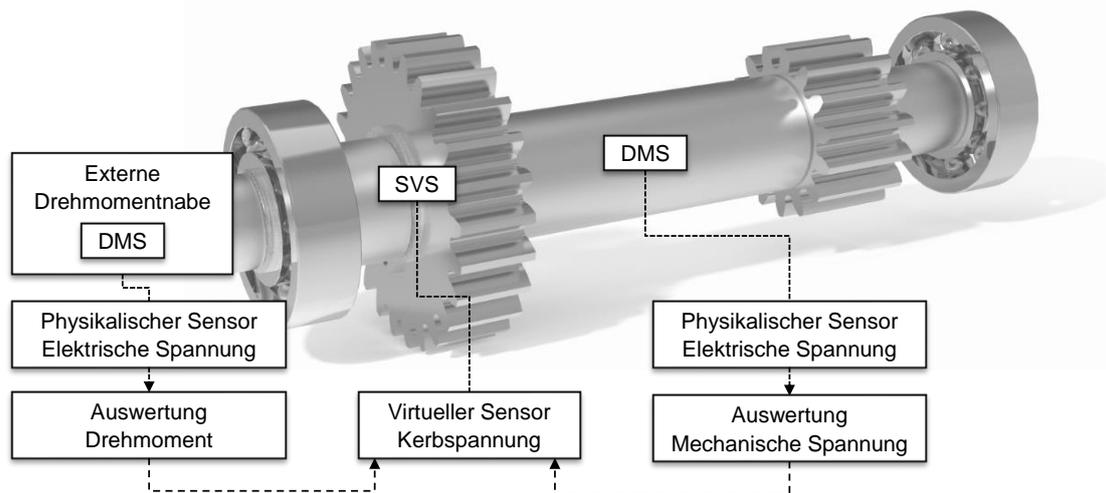


Bild 1: Exemplarisches Zusammenspiel von physikalischen und simulationsgestützten virtuellen Sensoren (SVS)

3.1. Anforderungen an die Genauigkeit simulationsgestützter virtueller Sensoren

An Sensoren werden hinsichtlich ihrer Genauigkeit hohe Anforderungen gestellt. Sensorwerte müssen neben einer möglichst hohen Richtigkeit ebenso eine möglichst hohe Präzision aufweisen.

Bei SVS auf Basis einer FEA wird die Qualität der Messergebnisse von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Hierzu zählen unter anderem die Güte der Eingabedaten, die Abbildungsgenauigkeit des 3D Modells und der Materialeigenschaften im Vergleich zum realen, toleranzbehafteten Bauteil sowie die Wahl der Randbedingungen wie zum Beispiel der Temperatur. Die Qualität der Berechnungsergebnisse ist direkt abhängig von der Qualität der Eingabedaten, weshalb sich Messunsicherheiten bei PS direkt auf SVS auswirken. Neben den genannten, für den Anwendungsfall spezifischen Faktoren wird die Genauigkeit der Ergebnisse auch vom Gleichungslöser und der Netzqualität des Finite-Elemente-Netzes beeinflusst. Ein feineres Netz führt in der Regel zu einem genaueren Ergebnis, benötigt jedoch eine längere Rechenzeit. Die Geschwindigkeit von SVS, die zur Messzeit eine FEA ausführen, ist somit in den meisten Fällen umgekehrt proportional zu deren Genauigkeit.

3.2. Echtzeitfähigkeit simulationsgestützter virtueller Sensoren

Echtzeitsysteme haben eine Aufgabe in einem definierten Zeitfenster zu erfüllen [9]. Die Dauer dieses Zeitfensters, hier als kritischer Zeitrahmen bezeichnet, ist vom Prozess abhängig und kann frei angepasst werden. Im hier geschilderten Fall ist innerhalb dieses Zeitfensters der gesamte Prozess vom Einlesen und Vorbereiten der Eingabegrößen bis zur Ausgabe der virtuell erstellen Sensorwerte auszuführen. Generell ist zwischen drei Typen von Anwendungen, bezogen auf deren kritisches Zeitfenster, zu unterscheiden [9]:

- Aufgaben, bei denen Nichteinhalten des Zeitfensters zu einem kritischen Fehler oder zu einem Systemausfall führt,
- Aufgaben, bei denen eine schnelle Ausführung zwar vorteilhaft ist, langsame oder unvorhergesehene Ergebnisse jedoch keinen Ausfall hervorrufen,
- Aufgaben, die keinen kritischen Zeitrahmen beinhalten.

SVS können auf verschiedene Arten realisiert werden und somit bei allen drei genannten Anwendungstypen eingesetzt werden. Bei der Konzeption eines SVS ist darauf zu achten, dass die gewählte Umsetzung für den vorliegenden Anwendungstyp geeignet ist. In Kapitel 4 werden exemplarisch zwei Möglichkeiten für die Realisierung von SVS vorgestellt, wovon eine

für Aufgaben ohne kritischen Zeitrahmen und eine für Aufgaben mit kritischen Zeitrahmen geeignet ist.

3.3. Grenzen simulationsgestützter virtueller Sensoren

Bei der Erstellung von Modellierungs- und Lösungsstrategien ist auf die Grenzen der SVS zu achten. Nur so können Gültigkeitsbereiche und Genauigkeiten sinnvoll einkalkuliert werden. VS weisen Grenzen analog zu PS auf, die von der Präzision und Richtigkeit abhängig sind. Daher müssen diese von Präzision und Richtigkeit der FEA abhängigen Grenzen ermittelt und bei der Wahl der Umsetzungsmethode der SVS berücksichtigt werden.

Im Zuge der Fehlervermeidung sollten auch Eingabedaten, das heißt die Messergebnisse der PS, auf Plausibilität geprüft und außerhalb der Spezifikation liegende Werte entfernt werden. Tritt dies ein, so bedarf es einer Unterscheidung, ob die für die Berechnung notwendigen Randbedingungen durch die Auswertung von noch verfügbaren Eingabedaten bestimmbar sind oder der SVS die Situation nicht mehr abbilden kann. In diesem Fall sind Eingabedaten aus alternativen Quellen zu verwenden oder die Messung mittels SVS wird bis zur erneuten Verfügbarkeit qualitativ ausreichender Eingabedaten ungültig. Unterschiedliche Anforderungen, zum Beispiel an Genauigkeit, Auswertegeschwindigkeit und Auswertehäufigkeit, erfordern verschiedene Herangehensweisen. Ist eine Berechnung zur Laufzeit, wie sie in Kapitel 4.1 gezeigt wird, nicht in der geforderten Geschwindigkeit möglich oder würde einer zu großen Reduzierung der Elementanzahl und damit der Genauigkeit bedürfen, so müssen Strategien entwickelt werden, wie die Ergebnisse dennoch zur Verfügung gestellt werden können. Eine mögliche Vorgehensweise wird in Kapitel 4.2 vorgestellt.

4. Methodik simulationsgestützter virtueller Sensoren

Anhand der in Kapitel 3 aufgezeigten Grenzen von SVS ist abhängig vom Anwendungsfall ein differenziertes Vorgehen erforderlich, um die SVS optimal und effizient einsetzen zu können. Zur Deckung des Bedarfs sowohl nach einer exakten Berechnung ohne Anforderung der Echtzeitfähigkeit als auch nach einem echtzeitfähigen SVS mit weiterhin hoher Genauigkeit wurden die nachfolgenden Methoden entwickelt. Um bei der Wahl der Methode zu unterstützen, wird in Kapitel 4.3 zudem eine Entscheidungslogik bereitgestellt.

4.1. Exakte Berechnung durch direkte simulationsgestützte virtuelle Sensoren

Durch ihr Merkmal der automatisierten Ein- und Ausgabe eignen sich SVS insbesondere dafür, den Bedarf nach Informationen zum Zustand eines gleichbleibenden Bauteils zu decken. Dabei wird die Art der Eingabe- und Ausgabeparameter nicht verändert, sondern diese zwischen den Simulationen auf den aktuellen Stand gebracht und dadurch aktualisiert. Beispielsweise werden bei der Verwendung von SVS an einem Balken zur Biegespannungsüberwachung ausschließlich die als Eingabegrößen fungierenden Lagerkräfte aktualisiert, während alle anderen Parameter wie Materialeigenschaften und Festrandbedingungen gleichbleiben. Werden zwischen den Simulationen grundlegende Parameter geändert oder das zu Grunde liegende Modell ausgetauscht, so entspricht dies nicht dem Anwendungsziel der vorgestellten SVS.

Ausgangslage für die Erstellung neuer Modellierungskonzepte stellt eine klassische FEA dar. Um geeignete Modellierungskonzepte entwickeln zu können, müssen vorab die Integrationsmöglichkeiten von VS und von Schnittstellen zu PS in den klassischen Ablauf einer FEA untersucht werden. Bild 2 zeigt den Ablauf einer konventionellen FEA mit den Verknüpfungspunkten zu VS, sowie die Integration von Messdaten aus PS.

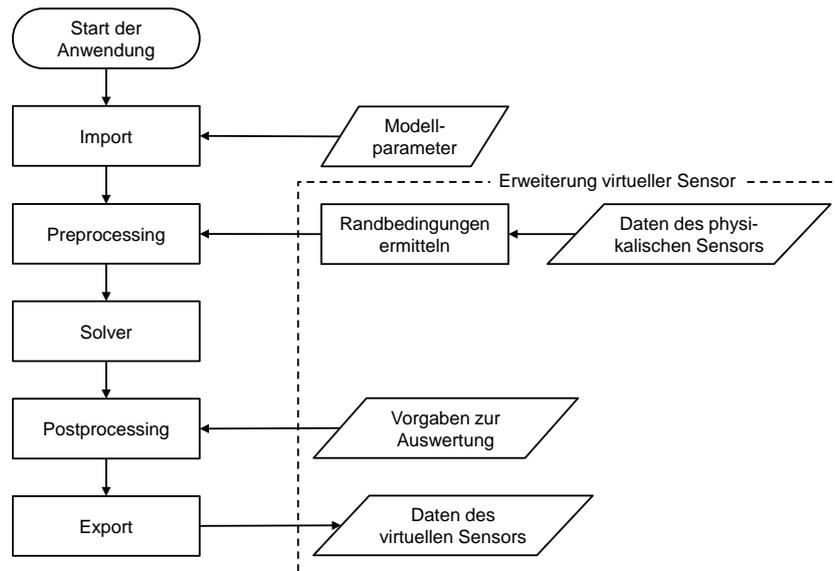


Bild 2: Ablauf einer um einen virtuellen Sensor erweiterten Finite-Elemente-Analyse

Die Ausgaben der SVS basieren auf den Simulationsergebnissen der zu Grunde liegenden FEA, die abhängig vom Anwendungsfall ausgewertet werden. Die Ausgabe stellt somit nicht die aus Finite-Elemente-Programmen übliche Ergebnisvisualisierung mittels farblich gekennzeichnete grafischer Visualisierung dar, sondern einen skalaren Wert, einen Vektor einer Ergebnisgröße oder auch eine qualitative Aussage für einen definierten Ort. Die Zielbereiche werden vom Nutzer durch die Wahl geeigneter Knoten- oder Element-Sets festgelegt. Die Handhabung der durch einen VS erzeugten Daten soll äquivalent zum Umgang mit durch PS erzeugten Daten ablaufen. Die SVS können so gestaltet werden, dass der Anwender bei der Handhabung der Sensordaten keinen aus der Datenquelle resultierenden Unterschied feststellt.

Nachdem vom Anwender die ihn interessierenden Ausgabewerte bestimmt sind, werden von ihm im nächsten Schritt die zu verwendenden Eingabegrößen festgelegt. Dabei ist die Verfügbarkeit von Messdaten zu beachten und ein ausreichender Informationsgehalt für die SVS sicherzustellen. Auch sind Schnittstellen notwendig, um eine Verbindung zwischen den SVS und den jeweiligen Datenlieferanten herzustellen und die Daten automatisiert einlesen zu können. Die Grundlage zur Erzeugung von Finite-Elemente-Modellen stellen die Daten aus dem Konstruktionsprozess, zumeist CAD-Daten, dar. Maschinenelemente wie Wellen, Lager und Schrauben lassen sich oft vereinfacht durch einen 2D-Querschnitt der Geometrie beschreiben. Durch Ausnutzung der Bauteilsymmetrien können daraus automatisiert strukturierte Finite-Elemente-Netze generiert werden, bei welchen implizit die Einhaltung einer definierten Netzqualität gewährleistet ist [10]. Diese vereinfachte Vernetzung kann dazu beitragen den Aufbau von Modellen zu erleichtern und dadurch als Teil der SVS die Handhabung für den Anwender zu vereinfachen.

Neben der Geometrie und den Eigenschaften des Bauteils sind für Berechnungen mittels FEA und SVS Randbedingungen nötig. Dazu zählen auch die veränderlichen Parameterwerte, die den aktuellen Zustand des zu messenden Objekts beschreiben. Dies können beispielsweise veränderte Lagerungsbedingungen infolge größer werdender Reibung oder thermisch bedingter Spielverkleinerungen sein. Als Grundlage zu deren Bestimmung dienen beispielsweise Sensorwerte aus PS. Daneben besteht auch die Möglichkeit Parameter vom Anwender selbst wählen zu lassen ohne die Notwendigkeit einer physikalischen Messung. Die als Datengrundlage verwendeten Messgrößen aus PS können in verschiedenen Einheiten vorliegen [6]. Abhängig vom Datentyp der benötigten Randbedingungen und der in einem vorherigen Schritt bestimmten Eingabegrößen kann es notwendig sein, eine Umrechnung oder Konvertierung vorzunehmen. Dies können zum Beispiel Einheitenkonvertierungen oder die

Ermittlung von Gesamtverschiebungen aus Teilverschiebungen sein. Der Ablauf für die Aufbereitung der Eingangsdaten wird vom Nutzer vorgegeben und kann je nach Bedarf manuell oder auch automatisiert erfolgen. Während eines Versuches werden verschiedene Parameter unterschiedlich stark beeinflusst. So können manche Randbedingungen unabhängig von der Belastung sein und für die Messung vereinfacht als nicht veränderlich eingestuft werden, um so die Modellierung zu vereinfachen. Daraus folgend müssen weniger veränderliche Parameter erfasst werden als für die Erstellung des Modells des SVS notwendig sind.

Die Überprüfung der Randbedingungen und der Konzepttest des zu erstellenden SVS erfolgt durch eine Berechnung mittels einer konventionellen FEA, wodurch sichergestellt wird, dass die zur Verfügung gestellten Randbedingungen ausreichen, um den Zustand des zu untersuchenden Bauteils zu ermitteln. Durch einen Abgleich von Simulationsergebnissen mit Daten von realen Prüfstandsversuchen, die nicht den Eingabedaten entsprechen, kann das dem SVS zugrundeliegende Finite-Elemente-Modell validiert werden.

Zuletzt gilt es eine Strategie festzulegen, wie die Simulationsergebnisse dem Nutzer sowie nachfolgenden Anwendungen zur Verfügung gestellt werden können. Je nach geforderter Aussage sind hier verschiedene Verfahren notwendig, um dem System die wesentlichen Informationen zu entnehmen. Ist das Ziel zum Beispiel die Bestimmung der mittleren Spannung in einem bestimmten Bereich, so ist dieser Bereich durch die Wahl der zugehörigen Knoten zu definieren. Im Anschluss können die zu den Knoten gehörigen Spannungen nach jedem Simulationsvorgang automatisiert gemittelt werden.

Mit dem Festlegen der Auswertestrategien und der Bereitstellung der Sensorergebnisse über eine Schnittstelle wird die Erstellung der SVS beendet. Der Anwender hat nun die Möglichkeit die SVS in seinen Messaufbau einzubinden und anzuwenden.

Der in diesem Kapitel beschriebene Aufbau der SVS erfolgt vor der eigentlichen Messung und kann zeitlich getrennt ablaufen. Um die SVS für die Messung vorzubereiten, ist somit nur das gespeicherte Modell aufzurufen und die Verknüpfung der Eingabe- und Ausgabeparameter zwischen SVS und dem Messsystem herzustellen. Anschließend ist die Dateneingabe durch den Benutzer oder die automatisierte Datenaufnahme aus dem Messsystem möglich. Aus diesen Daten werden während der Ausführung der SVS nach vorab definierten Kriterien die veränderlichen Randbedingungen ermittelt. Da die Modellparameter sowie alle für die Messung nicht veränderlichen Randbedingungen bereits bei der Erstellung des SVS definiert werden, erfolgt nach der Eingabe der dynamischen Randbedingungen direkt der Start des Gleichungslösers und somit die Berechnung. Sobald die Berechnung abgeschlossen ist, folgt die automatisierte Auswertung der Ergebnisse sowie die Übergabe der digital erzeugten Sensorwerte. Im Anschluss liest der SVS die zu diesem Zeitpunkt aktuellen Eingabedaten ein und wiederholt das restliche Vorgehen.

Die Berechnung mittels FEA liefert exakte Ergebnisse auf Basis der spezifischen Eingabedaten und des exakt auf den Anwendungsfall zugeschnittenen Simulationsmodells, benötigt aber aufgrund des hohen numerischen Aufwands eine gewisse Berechnungszeit. Hinzu kommt die benötigte Zeit für die Auswertung der von PS und VS erzeugten Daten. Die gesamte Zeitspanne ist von der Anzahl der Sensoren und dem Umfang des Modells abhängig und kann von Sekundenbruchteilen bis hin zu Tagen reichen. So besitzen VS unvermeidbare Limitierungen hinsichtlich ihrer Performance [4].

4.2. Echtzeitfähiger Ansatz durch datenbasierte simulationsgestützte virtuelle Sensoren

Werden SVS für Aufgaben mit einem kritischen Zeitfenster verwendet, so ist die Möglichkeit zur Bereitstellung der Sensordaten in Echtzeit erforderlich. Um den Anforderungen nach einer schnellen Verfügbarkeit gerecht zu werden, wird die Verlagerung des Berechnungszeitpunktes vor die „Messung“ geprüft. Einen exemplarischen Ablauf, der die Erstellung von Datenbanken

zur Bestimmung der Sensorwerte aus VS darstellt, zeigt Bild 3 links. Der Vorgang zur Auswertung der Datenbank ist in Bild 3 rechts dargestellt. Der Prozess gestaltet sich hier in den Grundzügen analog zum in Kapitel 4.1 vorgestellten Vorgehen. Die Durchführung einer Simulation zur Laufzeit wird bei diesem Ansatz durch einen Abruf der zu den Randbedingungen passenden Werte aus der vorab zu erstellenden Datenbank ersetzt.

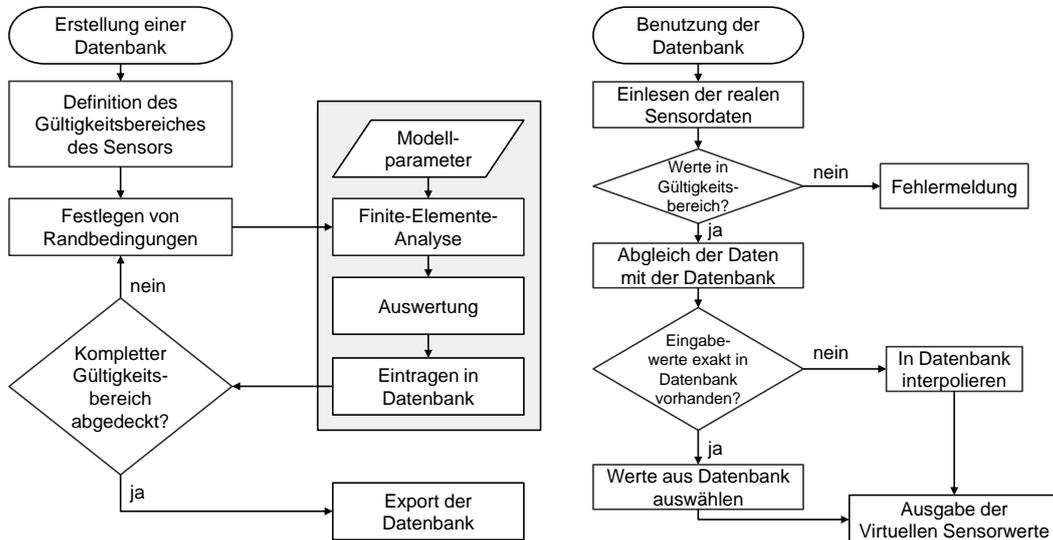


Bild 3: Realisierung von simulationsgestützten virtuellen Sensoren mittels Datenbank
links: Datenbankerstellung; rechts: Datenausgabe

4.3. Entscheidungslogik zur angepassten Wahl der Methode

Um die Wahl der geeigneten Methoden für einen bestimmten Anwendungsfall zu erleichtern, wird die Entscheidung anhand definierter Kriterien, welche als Bestandteil der Entscheidungslogik in Bild 4 dargestellt sind, getroffen. Neben der Abfrage der Notwendigkeit einer Echtzeitfähigkeit gilt es ebenso zu beachten, ob eine wiederkehrende Abfrage wahrscheinlich ist. Sollte eines dieser Kriterien positiv beantwortet werden, so wird in Bild 4 auf die Realisierung mittels Datenbank hingewiesen. Ist eine Echtzeitfähigkeit nicht notwendig, so kann das in Bild 2 vorgestellte Verfahren der Realisierung des SVS mittels Berechnung zur Echtzeit angewendet werden.

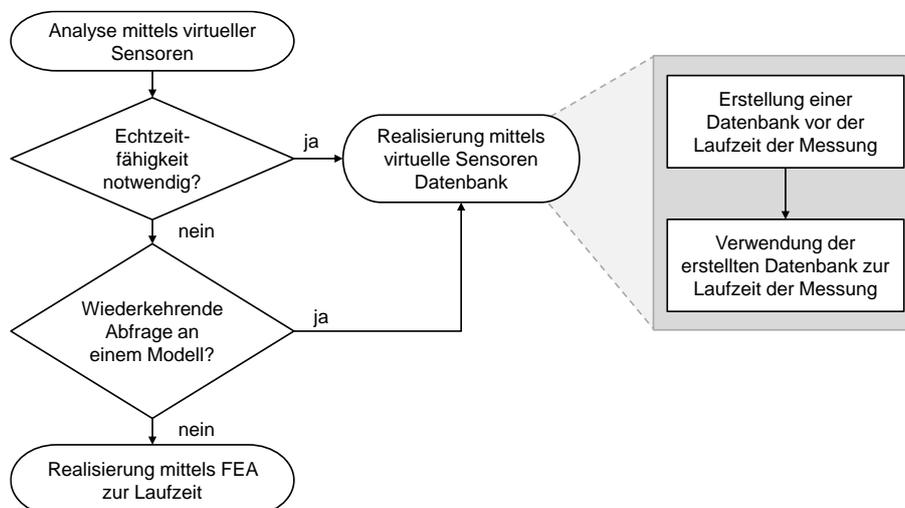


Bild 4: Entscheidungsvorgang zur Wahl des Verfahrens zur Realisierung

5. Beispiel der Anwendung eines virtuellen Sensors im elektrischen Antriebsstrang

Eine mögliche Anwendung von SVS wird im Folgenden im Kontext der Elektrifizierung von Antriebssträngen beispielhaft erläutert. In diesem Zusammenhang gewinnen Anforderungen wie das Noise-Vibration-Harshness (NVH)-Verhalten immer mehr an Bedeutung. Ein Beispiel hierfür ist die Verwendung von Kunststoffzahnradern im Getriebe von Elektrofahrzeugen, um NVH-Emissionen zu senken. Die Verwendung von innovativen Konzepten oder Materialien, für die keine jahrzehntelange Erfahrung im entsprechenden Anwendungsfall existiert, erfordert jedoch eine genaue Analyse des Zustands des Bauteils. Gerade hier können SVS dabei unterstützen, einen vollumfänglichen Überblick über die Belastung der innovativen Maschinenelemente zu erhalten, der rein auf Basis von PS nicht oder nur sehr aufwendig bestimmbar ist.

So sollen zum Beispiel bei der Entwicklung eines fiktiven Antriebsmoduls, bestehend aus Elektromotor und zweistufigem Getriebe, die maximalen Spannungen in einem Zahnrad aus Kunststoff ermittelt werden. Dieses Zahnrad ist mittels Presspassungen mit der zweiten Getriebewelle verbunden und soll durch seine dämpfenden Eigenschaften einen besonders ruhigen Lauf ermöglichen. Da für die Messung eine konstante Drehzahl und der eingeschwingene Zustand vorgegeben sind, ist keine Echtzeitfähigkeit notwendig, weshalb das in Kapitel 4.1 vorgestellte Vorgehen angewendet wird. Die Maximalspannung als Ausgangsgröße ist durch die Aufgabenstellung bereits vorgegeben. Als Eingabegrößen dienen das auf der Getriebeausgangswelle gemessene Drehmoment, die am Elektromotor gemessene Drehzahl und die Temperatur am Zahnrad. Alle von den entsprechenden PS stammenden Eingabegrößen bilden elektrische Spannungen ab, weshalb sie vor der Verwendung als Randbedingungen auf die gewünschten Einheiten, welche vom Finite-Elemente-Gleichungslöser unterstützt werden, umgerechnet werden. In diesem exemplarischen Fall wird aus dem Drehzahlsignal die Zentrifugalbeschleunigung und aus dem Drehmomentsignal das Drehmoment errechnet. Die Modellparameter, die Geometrie und Material beschreiben, und die weiteren Randbedingungen, wie die Presspassung auf der Welle, werden entsprechend des Anwendungsfalles modelliert. Dies verkleinert das 3D-Modell für die FEA auf das Zahnrad selbst und die Welle der zweiten Getriebestufe ein. Zur Bestimmung der zwei Spannungswerte werden Knoten im Finite-Elemente-Netz, die in den betreffenden Bereichen liegen, gewählt. Während der Messung wird ein Betriebspunkt angefahren, gewartet bis die Sensordaten berechnet sind und im Anschluss der nächste Betriebspunkt angefahren. Zu jedem Betriebspunkt stehen somit die während der Prüfstandsmessung mittels PS gewonnenen Messdaten und die von den SVS zur Verfügung, um so den elektrischen Antriebsstrang umfänglich überwachen zu können.

Wird während des Messvorgangs die Drehzahl schnell variiert und ist eine hohe Messauflösung erforderlich, so könnten die SVS auf Basis einer Datenbank aufgebaut werden. In diesem Fall würden die oben genannten Modellparameter vor der Messung aufgenommen werden und ein Gültigkeitsbereich für die Drehzahlen, Drehmomente und Temperaturen definiert. Auf dieser Basis des oben beschriebenen Modells wird mittels Parametervariationen eine Datenbasis erstellt, auf die zur Laufzeit zugegriffen werden kann.

6. Zusammenfassung und Ausblick

SVS bieten unter anderem die Möglichkeit, die in Prüfstandsversuchen gewonnenen Messdaten dafür zu verwenden, ergänzende Messdaten für ein vertiefendes Verständnis an physikalisch schwer zugänglichen Stellen des Bauteils zu generieren. Dies bietet eine kosteneffiziente Möglichkeit zur Zustandsbestimmung von Bauteilen und steigert zugleich den Informationsgehalt der von PS gemessenen Daten. Für die Implementierung und Umsetzung der SVS gibt es zahlreiche Möglichkeiten, welche passend zu den an sie gestellten Anforderungen und den Anwendungsfall gewählt werden müssen. Aufgrund der einfachen

Anwendung und der Bereitstellung der virtuell erstellten Messdaten in etablierten Datenformaten, können SVS ohne großen Aufwand in bestehende Entwicklungsprozesse integriert werden. Auch wurde eine Methode gezeigt, wie sich SVS in einem Umfeld, das eine Echtzeitfähigkeit erfordert, umsetzen lassen.

Für die Zukunft bestehen vielfältige Möglichkeiten zur Erweiterung der vorgestellten Methoden durch weitere Umsetzungsmöglichkeiten oder Integrationsmöglichkeiten. So ist die Verwendung von SVS für die Gewinnung von zustandsbeschreibenden Daten für die breite Einführung von Predictive Maintenance denkbar oder die Integration in digitale Zwillinge. Neben der vorgestellten Möglichkeit die Datenbank zu verwenden, bietet es sich auch an, diese Datenbasis für weitere Zwecke oder andere Auswertemöglichkeiten zu verwenden. Eine solche Möglichkeit ist die Nutzung der Datenbank, um Trainingsdaten für ein Machine Learning Modell bereitzustellen, mit dessen Hilfe das zu den Daten gehörige Bauteil genauer beschrieben werden kann.

Danksagung

Die vorgestellte Forschungsarbeit ist Teil des bayerischen Forschungsverbundes „FORCuDE@BEV - Customized Digital Engineering für Bayerische KMU“ und gefördert durch die Bayerische Forschungsförderung (BFS).

Für den Inhalt dieser Publikation sind die Autoren verantwortlich. Die Autoren danken der Bayerischen Forschungsförderung (BFS) für die finanzielle Unterstützung.

Literaturverzeichnis

- [1] DECKER, Karl-Heinz (Hrsg.); KABUS, Karlheinz (Hrsg.); RIEG, Frank (Hrsg.): *Maschinenelemente*. 20., neu bearbeitete Auflage. München : Hanser, 2018 (Das Fachwissen der Technik)
- [2] DEMENTYEV, Alexander: *Verbesserung der Performance von virtuellen Sensoren in totzeitbehafteten Prozessen*, 2014
- [3] HERING, Ekbert (Hrsg.); SCHÖNFELDER, Gert (Hrsg.): *Sensoren in Wissenschaft und Technik : Funktionsweise und Einsatzgebiete*. 2., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2018
- [4] GOODWIN, Graham C.: Evaluating the performance of virtual sensors. In: *1999 Information, Decision and Control. Data and Information Fusion Symposium, Signal Processing and Communications Symposium and Decision and Control Symposium. Proceedings (Cat. No.99EX251)* : IEEE, 1999, S. 5–12
- [5] WALTER, Andreas ; KIENCKE, Uwe ; JONES, Stephen ; WINKLER, Thomas: *Das Zweimassenschwungrad als virtueller Sensor*. In: *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* 68 (2007), Nr. 6, S. 486–493
- [6] RAVEENDRANATHAN, Nikhil ; GALZARANO, Stefano ; LOSEU, Vitali ; GRAVINA, Raffaele ; GIANNANTONIO, Roberta ; SGROI, Marco ; JAFARI, Roozbeh ; FORTINO, Giancarlo: *From Modeling to Implementation of Virtual Sensors in Body Sensor Networks*. In: *IEEE Sensors Journal* 12 (2012), Nr. 3, S. 583–593
- [7] MILANESE, M. ; NOVARA, C. ; HSU, K. ; POOLLA, K.: *Nonlinear virtual sensors design from data*. In: *IFAC Proceedings Volumes* 39 (2006), Nr. 1, S. 576–581
- [8] KLOSTERMEIER, Robin ; HAAG, Steffi ; BENLIAN, Alexander: *Digitale Zwillinge – Eine explorative Fallstudie zur Untersuchung von Geschäftsmodellen*. In: *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik* 55 (2018), Nr. 2, S. 297–311
- [9] ARMSTRONG, Edwin ; HARDY, Nigel: *Real-time Virtual Sensors*. In: *IFAC Proceedings Volumes* 33 (2000), Nr. 27, S. 195–200
- [10] VIEBAHN, Felix: *Systematische Untersuchung der Anwendbarkeit der Finite-Elemente-Analyse zur Abbildung des Wälzlagerwanderns mittels der statistischen Versuchsplanung*. 1. Aufl. Aachen : Shaker, 2018 (Fortschritte in Konstruktion und Produktion Band 40)